

# ENSAYO DE ADHERENCIA DE CAPAS DE FIRME (NLT-382/08): INFLUENCIA DE LA DOTACIÓN DEL LIGANTE Y LA MACROTEXTURA

José Manuel Berenguer<sup>1</sup>, Adriana Martínez<sup>2</sup>, Carmen Calvo<sup>3</sup>, Pedro Hernández<sup>4</sup>, Ricardo Gomariz<sup>5</sup>, Isaías García<sup>5</sup>, Teresa Real<sup>6</sup>

<sup>1</sup>Eiffage Infraestructuras. Alicante [jberenguer@infraestructuras.eiffage.es](mailto:jberenguer@infraestructuras.eiffage.es)

<sup>2</sup>Universidad Politécnica de Cataluña. [adriana.martinez@upc.edu](mailto:adriana.martinez@upc.edu)

<sup>3</sup>Centro Regional de Control de Calidad. Junta de Castilla y León [calrevca@jcyl.es](mailto:calrevca@jcyl.es)

<sup>4</sup>Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Murcia. [pfhernandez@fomento.es](mailto:pfhernandez@fomento.es)

<sup>5</sup>Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia [isaias.garcia@carm.es](mailto:isaias.garcia@carm.es)

<sup>6</sup>Universidad de Alicante [teresa.real@ua.es](mailto:teresa.real@ua.es)

## Resumen

En este trabajo se resumen los resultados obtenidos por la asociación ALEAS en el estudio del ensayo para determinar la adherencia entre capas de firmes según la norma NLT-382/08. Se han realizado estudios a diferentes niveles: Ejercicios interlaboratorio con probetas fabricadas en laboratorio para comparar los resultados obtenidos con los dos dispositivos de corte recogidos en la norma; resultados obtenidos en testigos extraídos en diferentes tramos de carretera; evaluación de la dotación de ligante en riego de adherencia y macrotextura de las capas adheridas en los valores de resistencia a esfuerzo cortante y finalmente desarrollo de un modelo de elementos finitos para obtener las tensiones tangenciales entre capas de firme.

Los resultados obtenidos en el ejercicio de interlaboratorio con el dispositivo B y los resultados de la campaña de extracción de testigos ya se presentaron en el XIX CILA [1], por lo que el presente trabajo se centra en la comparativa de los resultados obtenidos con los dispositivos de corte A y B en los ejercicios interlaboratorio y en establecer dotaciones óptimas de ligante en riego de adherencia para diferentes tipos de mezclas bituminosas. También se mostrarán los resultados del modelo de elementos finitos para diferentes tipos de mezclas.

Los resultados muestran que los dos dispositivos conducen a resultados significativamente diferentes, más elevados con el dispositivo A, mientras que la precisión de ambos métodos si es comparable. Las dotaciones óptimas para los diferentes tipos de mezclas están en el entorno de 400-600 g/m<sup>2</sup> de ligante residual, aunque se alcanzan valores próximos al máximo a partir de 200 g/m<sup>2</sup>. Los valores de adherencia están fuertemente influenciados por la macrotextura de las capas a unir, pero no se puede establecer una relación univariante dotación-macrotextura. La modelización mediante elementos finitos conduce a unos valores de resistencia a esfuerzo cortante menores que los establecidos en la normativa en todos los tipos de mezclas estudiadas

**Palabras Clave:** Adherencia, resistencia a esfuerzo cortante, dotación óptima, macrotextura.

## 1 Introducción y objetivos

Una buena adherencia entre las diferentes capas de que forman el paquete estructural de un firme asegura que éste trabaje solidariamente, con el fin de resistir mejor los esfuerzos del tráfico, reduciendo las deformaciones y el deslizamiento. Se evitan así fallos del tipo de arrollamientos transversales o grietas parabólicas en zonas sometidas a frenadas y aceleraciones. Es por esto que en el artículo 531 del PG-3 [2] se establece la necesidad de realizar el ensayo de adherencia entre capas según NLT-382 [3], para verificar que la resistencia al esfuerzo cortante supera el valor de 0,60 MPa, cuando una de las capas sea de rodadura, o de 0,40 en el resto de casos.

La citada norma permite el uso de dos dispositivos de corte diferentes (Figura 1) para realizar el ensayo, pero no se dispone de datos suficientemente contrastados que aseguren la equivalencia de los

resultados obtenidos con cada uno de ellos. En el dispositivo A la carga se aplica mediante una mordaza de dos cuerpos, contenidas en un plano perpendicular al testigo-probeta, sobre el que se aplica un esfuerzo en la interfaz de las dos capas (esfuerzo cortante puro). El dispositivo B consiste en una mordaza cilíndrica desmontable en la que se introduce el testigo-probeta. El punto de aplicación de la carga está equidistante de los dos puntos de apoyo del conjunto, que actúa, así como una viga biapoyada, donde la sección de ensayo está sometida a esfuerzo cortante

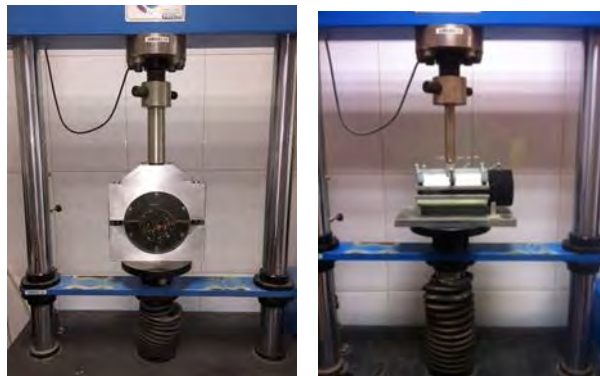


Figura 1. Dispositivos de corte A y B de la NLT 382/08

Los objetivos de este trabajo son:

- Evaluar si existen diferencias significativas entre los resultados obtenidos con los dispositivos incluidos en la norma y estimar la precisión del ensayo.
- Establecer, para diferentes tipos de mezclas, la relación entre la dotación de ligante residual y los parámetros del ensayo (resistencia a esfuerzo cortante y energía).
- Desarrollar un modelo de elementos finitos para obtener las tensiones tangenciales que pueden llegar a la unión entre distintas capas de un paquete de mezcla bituminosa

## 2 Plan experimental

### 2.1 Ejercicios interlaboratorio

Se han llevado a cabo 2 ejercicios interlaboratorio: El primero con el dispositivo B y el segundo con el dispositivo A, en dos años consecutivos. Previamente, se distribuyó entre los laboratorios participantes el protocolo para la realización del ejercicio de intercomparación, así como los materiales necesarios: mezcla bituminosa AC16S, fabricada por Los Serranos (Grupo Eiffage), y dos emulsiones termoadherentes proporcionadas por Cepsa. La primera es una emulsión termoadherente C60B3, fabricada con un ligante convencional, mientras que el ligante de la segunda es un betún modificado C60BP3.

Las muestras de ensayo se prepararon del modo siguiente:

- Las probetas soporte, de 100 mm de diámetro, se fabricaron con la mezcla AC16S, mediante compactador giratorio (UNE-EN 12697-31), empleando los siguientes parámetros:
- Presión: 600 kPa. Ángulo: 0,82°.
- Número de giros totales: 288.
- Temperatura de compactación: 170°C.
- Precalentamiento de la muestra y los moldes: 2 horas.
- Estas probetas se cortaron para que su altura final fuera de 65 mm. Sobre la superficie de corte se extendió la emulsión a una dotación de 200 g/m<sup>2</sup> de betún residual.
- Para la capa superior se empleó el mismo tipo de mezcla. La compactación se realiza a la temperatura de 170°C siguiendo el procedimiento descrito en la norma NLT-161 [4], mediante una prensa de doble émbolo aplicando una presión máxima de 21 MPa mantenida durante 2 minutos.

- El ensayo se realiza a 20°C, con una velocidad de carga de 2,5 mm/min. A partir del gráfico carga-deformación de cada probeta ensayada se determina la carga máxima de rotura,  $F_{max}$ , expresada en N, la resistencia a esfuerzo cortante,  $T_c$  en MPa y la energía de deformación hasta rotura  $E_d$ , correspondiente al área limitada bajo la curva de ensayo hasta alcanzarse el valor de carga máxima.

## 2.2 Determinación de dotaciones óptimas

Se planteó trabajar con cuatro macrotexturas diferentes en la capa soporte y dos en la capa superior, con dotaciones teóricas de 0, 200 (mínima del PG-3), 500 y 800 g/m<sup>2</sup>. Los ensayos se realizaron en 6 laboratorios, que siguen trabajando con los dos dispositivos y una emulsión, C60BP3.

El plan de trabajo seguido fue:

- Selección de los tramos de extracción de testigos AC y BBTM, que se utilizarán como probetas soporte
- Medida de la macrotextura en esos tramos, con perfilómetro laser y círculo de arena
- Extracción de testigos (mínimo 288 AC y 144 BBTM)
- Fabricación de mezclas (420 kg AC y 840 kg BBTM)
- Fabricación de probetas soporte con giratoria (mismo n° y tipo que testigos)
- Determinación de la macrotextura de estas probetas. Para ello se prepararon probetas de pista y se midió la macrotextura con el círculo de arena.
- Envío de testigos, probetas (capa soporte), mezclas (capa superior) y emulsión
- Envío de protocolo

En cada uno de los 6 laboratorios participantes, los trabajos se establecen en 6 bloques, como se esquematiza en la figura siguiente:

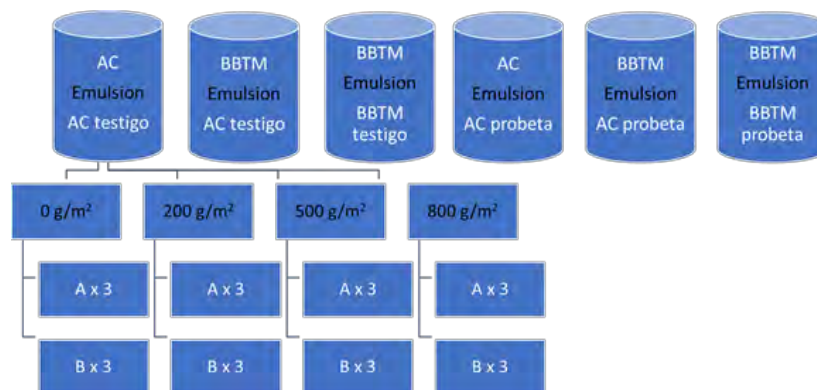


Figura 2. Plan experimental para determinar la dotación óptima en distintos tipos de mezclas

En los dos primeros bloques la capa soporte fue un testigo de mezcla tipo AC sobre la que se compacta mezcla AC o BBTM y en el tercero la capa soporte es un testigo de mezcla BBTM sobre la que se compacta mezcla BBTM. En los tres bloques siguientes la combinación de mezclas es la misma, pero la capa soporte fue una probeta fabricada en giratoria. En cada bloque se preparan 24 testigos: 6 testigos para cada dotación, y se ensayaron tres con el dispositivo A y tres con el B.

Todas las probetas soporte y las mezclas para compactar la capa superior utilizadas en este estudio han sido fabricadas por Aglomerados Los Serranos. Como en todas las fases del estudio, la emulsión ha sido proporcionada por CEPESA. Los laboratorios participantes son:

- Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia
- Laboratorio de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Murcia
- Centro de Estudios y Experimentación de Obras Públicas (CEDEX)
- Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava
- Universidad Politécnica de Cataluña.

- Centro Regional de Control de Calidad. Junta de Castilla y León

A diferencia de los realizado en el apartado 2.1, las probetas soporte no se cortaron. La dotación exacta de ligante residual se determina por pesada, una vez transcurridas 24 horas desde la extensión de la emulsión.

Según se observó en los apartados anteriores, las probetas confeccionadas en el laboratorio arrojan valores de adherencia bastantes superiores a los testigos de obra. En ensayos realizados en el Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia, se comprobó que la resistencia a esfuerzo cortante era proporcional a la presión de carga utilizada en la compactación mediante el doble émbolo, siendo mayor la resistencia cortante entre capas por el efecto de la presión de carga que por la concentración del betún residual entre las mismas. Éste hecho explica la diferencia de resistencias entre lo que se obtiene en obra y en el laboratorio. El confinamiento del material junto con una presión de carga de compactación tan alta, 21 MPa, supera con creces la fricción que se produce entre las capas en obra. Por esto se realizaron, sin emulsión, rampas de compactación a distintas presiones de carga para cada tipo de combinación de mezcla, AC/AC y BBTM/BBTM. Según los datos obtenidos, se establece que la rampa de compactación que se debe de utilizar para compactar las mezclas tipo BBTM, sobre cualquier probeta soporte, será de 5 MPa, mientras que para las mezclas tipo AC será de 10 MPa.

### 3 Resultados

#### 3.1 Ejercicios interlaboratorio

En el ejercicio interlaboratorio con el dispositivo B participaron 13 laboratorios, mientras que en el ejercicio con el dispositivo A, realizado un año después, participaron 14 laboratorios. Cada uno de estos laboratorios ha realizado 6 réplicas del ensayo para cada emulsión. Para realizar el tratamiento, se eliminaron los valores extremos, de modo que  $n=4$ .

Los parámetros analizados son resistencia a esfuerzo cortante y energía de deformación. La energía se ha calculado como el área bajo la curva carga-deformación hasta carga máxima, como se indica en la figura 3:

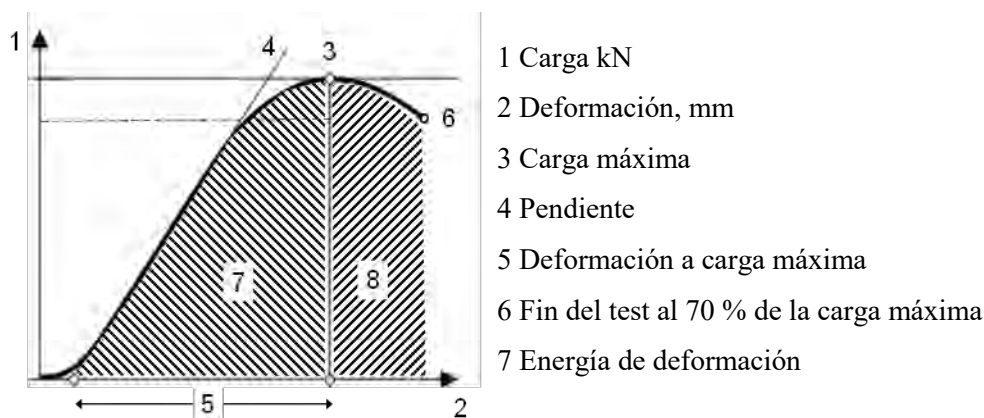


Figura 3. Cálculo de la energía y post-energía de deformación.

El tratamiento estadístico de los datos comienza con la detección de datos anómalos, mediante técnicas gráficas de consistencia (h y k de Mandel) y test de Cochran y Grubbs. Una vez eliminados los datos anómalos se procede al cálculo de la media general y de las varianzas. Se calcula la varianza de repetibilidad, la varianza interlaboratorios y la varianza de reproducibilidad, según UNE 82009-2 [5], y la media y la desviación estándar robusta mediante la norma ISO 13528 [6].

##### 3.1.1 Resultados para resistencia a esfuerzo cortante.

En la tabla 1 se resumen los resultados obtenidos con la emulsión C60B3 y C60 BP3 en cada uno de los dispositivos.

Tabla 1. Resultados para resistencia a esfuerzo cortante.

	Emulsión C60B3				Emulsión C60BP3			
	Dispositivo A		Dispositivo B		Dispositivo A		Dispositivo B	
	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528
Media, mm	1,84	1,85	1,34	1,34	1,94	1,99	1,37	1,38
$s_r$	0,17		0,13		0,13		0,12	
$s_R$	0,25	0,20	0,20	0,19	0,30	0,19	0,21	0,12
% CV <sub>r</sub>	9,0		9,4		6,9		9,1	
% CV <sub>R</sub>	13,5	10,9	15,2	14,0	15,3	9,5	15,6	8,3

Con estos datos, podemos establecer que la precisión obtenida con ambos dispositivos es comparable, con coeficientes de variación de repetibilidad entre el 5-10% y coeficientes de variación de reproducibilidad entre el 10-15%. Además, los valores medios obtenidos con el dispositivo A son mayores que los obtenidos con el B, en este caso del orden del 27-30%. No se observan diferencias significativas entre los resultados obtenidos con cada emulsión a la temperatura del ensayo, de 20°C.

### 3.1.2 Resultados para energía de deformación

En la tabla 2 se resumen los resultados obtenidos con la emulsión C60B3 y C60 BP3 en cada uno de los dispositivos.

Tabla 2. Resultados para energía de deformación.

	Emulsión C60B3				Emulsión C60BP3			
	Dispositivo A		Dispositivo B		Dispositivo A		Dispositivo B	
	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528	UNE 82009	ISO 13528	UNE 82009-2	ISO 13528
Media, julios	8,7	8,9	11,4	9,3	9,4	9,3	9,8	8,6
$s_r$	1,0		1,3		1,3		1,2	
$s_R$	1,6	1,3	8,2	3,2	1,5	1,1	6,1	2,5
% CV <sub>r</sub>	12		11		13		12	
% CV <sub>R</sub>	19	15	72	35	16	12	62	30

Los valores de precisión obtenidos con el dispositivo A mejoraron sustancialmente los obtenidos en el ejercicio del año anterior con el dispositivo B. No se puede asegurar que sea debido al uso del dispositivo de corte A, sino más bien a que los laboratorios revisaron la forma de cálculo de esta energía. En el ejercicio con el dispositivo A se ha mejorado considerablemente la homogeneidad de los resultados, con ambas emulsiones, y se han conseguido coeficientes de variación de reproducibilidad por debajo del 20%.

Aunque las precisiones obtenidas fueron muy diferentes y pueden afectar a la comparación de los valores medios, no se observaron diferencias significativas en los valores medios de energía de deformación obtenidos con ambos dispositivos.

### 3.2 Determinación de dotaciones óptimas



En la Figura 5 se muestran los resultados medios obtenidos para mezclas AC-AC. En términos de resistencia a esfuerzo cortante, el dispositivo A condujo a valores más elevados que el dispositivo B. En términos de energía (Energía de deformación ESBT y suma de energía de deformación y postdeformación E), los valores también fueron mayores cuando la capa soporte es una probeta, pero las diferencias no fueron significativas cuando es un testigo.

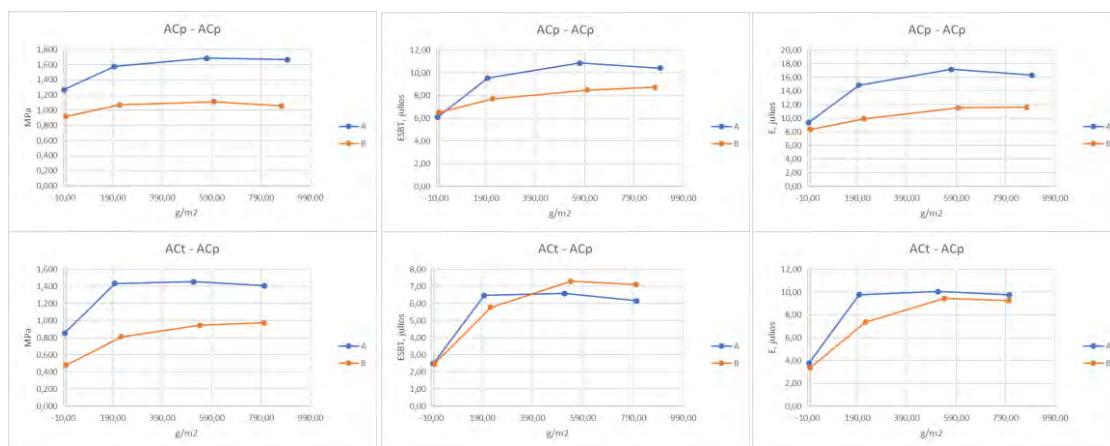


Figura 4.- Resistencia a esfuerzo cortante y energía vs dotación para mezclas AC-AC

Si se comparan los valores obtenidos cuando la probeta soporte es un testigo (gráficos ACt-ACp) y una probeta (gráficos ACp-ACp), observamos valores más altos de todos los parámetros cuando la capa soporte es una probeta fabricada en laboratorio. Estos soportes presentan diferentes macrotexturas, menor en probetas fabricadas en laboratorio que en testigos extraídos del firme, es decir, los valores son más altos para menores macrotexturas. Las dotaciones óptimas se encuentran en torno a 400-600 g/m² de betún residual, tanto en términos de resistencia a esfuerzo cortante como en energía.

Se llega a las mismas conclusiones cuando se ensayan testigos de AC-BBTM, como muestra la Figura 5: Valores más altos en todos los parámetros para el dispositivo A, y valores más bajos cuando la capa soporte es un testigo, es decir, a macrotexturas mayores.

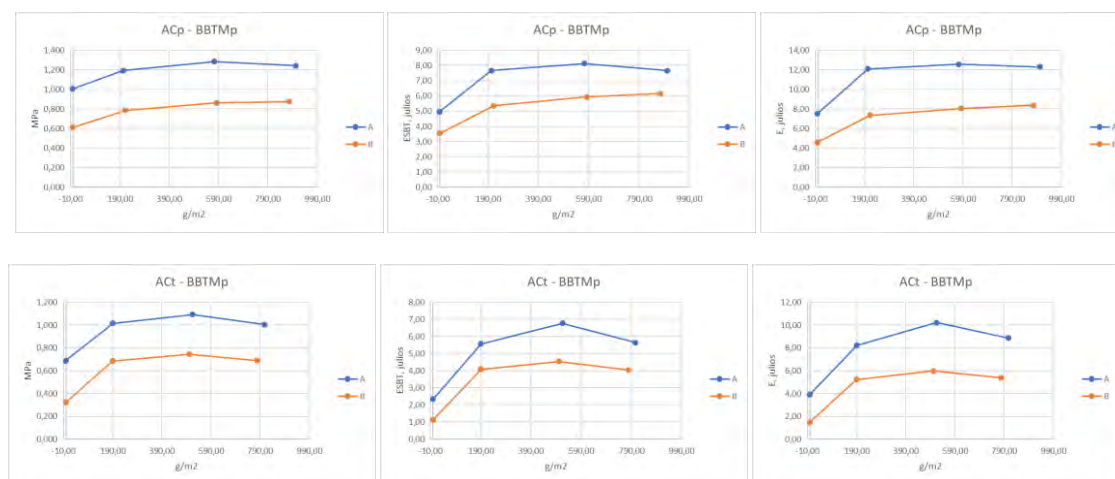


Figura 5.- Resistencia a esfuerzo cortante y energía vs dotación para mezclas AC-BBTM

A medida que aumenta la macrotextura, se observa mejor la diferencia entre los dos dispositivos, tanto en términos de resistencia a esfuerzo cortante como de energía. Finalmente, en el caso de BBTM-BBTM, los resultados son similares, en cuanto a influencia del tipo de dispositivo y macrotextura.

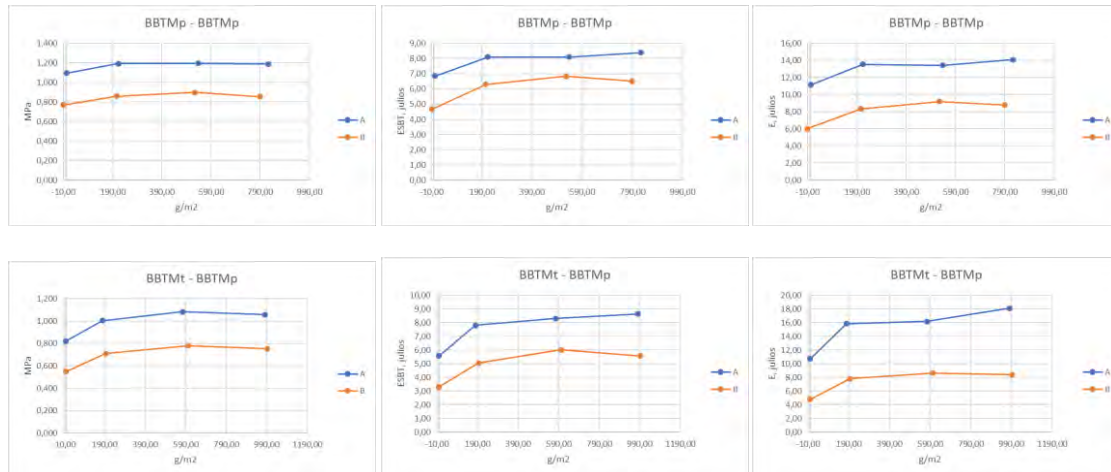


Figura 6.- Resistencia a esfuerzo cortante y energía vs dotación para mezclas BBTM-BBTM

En la Figura 7 se muestran los valores medios globales por dispositivo y mezclas. Se confirma la diferencia significativa entre los resultados proporcionados por cada dispositivo, y se confirman los resultados que veíamos antes en cada curva.

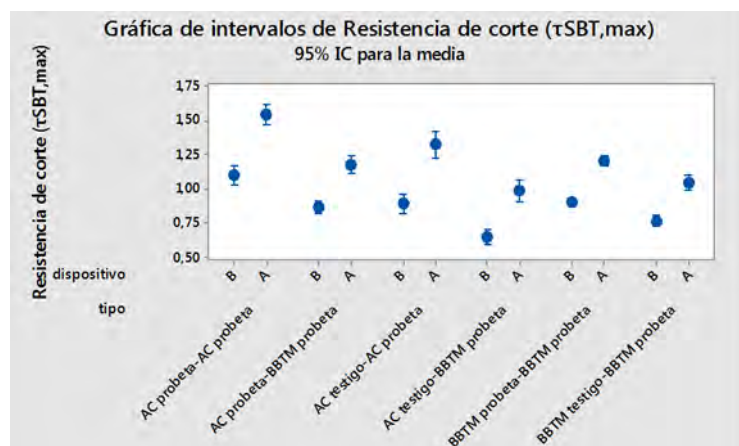


Figura 7. Valores medios globales por dispositivo para cada combinación de mezclas.

Los valores más altos se obtienen para las combinaciones AC-AC, y entre estas son más altos cuando la macrotextura de la capa soporte es menor. Los siguientes mejores resultados se obtienen para mezclas con probetas soporte (ACp-BBTM, del orden de los obtenidos con BBTBp-BBTM), y los peores resultados serían para capa soporte testigos y capa superior BBTM. Estos resultados son acordes con los obtenidos por Movilla et al [7], que observaron, para diferentes tipos de mezclas y dotaciones de ligante entre 125 y 500 g/m<sup>2</sup>, como aumentaban los valores de adherencia con la macrotextura a valores bajos, desde 0 hasta 0,7 - 0,9 mm según el tipo de mezcla, para disminuir a medida que aumentaba la macrotextura a partir de estos valores hasta 1,4 mm, .

La combinación ACprobeta-AC (Macrotexturas 0,70 – 0,70) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre dos mezclas tipo AC recién extendidas entre sí. Presenta los resultados más altos en resistencia de corte y energía. Es la que tiene macrotextura más baja, 0,70, que ayuda a retener en su superficie mayor cantidad de emulsión. La combinación ACtestigo-AC (0,82 – 0,70) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo AC agotada y la extensión de una nueva AC sobre ella. Es una de las combinaciones que se utiliza con más frecuencia en los refuerzos de firme. Son los que obtienen los segundos mejores resultados de todas las combinaciones, solo por debajo de la combinación ACprobeta-AC.

La combinación ACprobeta-BBTM (0,70 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una mezcla tipo BBTM extendida sobre una AC nueva. Si la comparamos con la ACprobeta-AC, sus resultados son menores lo que nos indica que la macrotextura de la capa superior también influye, pero si lo comparamos con la ACtestigo-BBTM, los valores son más altos. La combinación ACtestigo-BBTM (0,82 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo AC agotada y la extensión de un micro BBTM sobre ella. Es la combinación que arroja el peor resultado. Si la comparamos con la combinación ACtestigo-AC, se confirma que el incremento de la macrotextura de la capa superior afecta de forma negativa a la resistencia a cortante.

La combinación BBTMprobeta-BBTM (1,90 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo BBTM nueva y la extensión de un micro BBTM sobre ella. En la práctica, es una combinación que no se utiliza. Es una combinación que se encuentra en la zona media de todas las ensayadas debido, por un lado, a su alto valor a cortante con dotación cero y, según lo observado en laboratorio, a la interacción y anclaje de las partículas entre las dos mezclas con alta macrotextura. De igual forma, el betún residual de la mezcla favorece ese incremento a dotación cero, que en la siguiente combinación ensayada, BBTMtestigo-BBTM, desaparece.

Finalmente, la combinación BBTMtestigo-BBTM (2,65 – 1,90) reproduce el tipo de adhesión que se produce entre una capa tipo BBTM agotada y la extensión de un micro BBTM sobre ella. En la práctica es una combinación que no se utiliza por dudas respecto a su comportamiento frente a la adhesión entre sus capas pero que, según nuestros ensayos, se comporta prácticamente igual que la más utilizada ACtestigo-BBTM.

El siguiente paso es determinar la dotación óptima, para ello ajustamos las curvas resistencia a esfuerzo cortante/dotación para las distintas combinaciones de mezclas y determinamos el máximo. Los resultados se muestran en la Figura 8, donde se han indicado también las dotaciones mínimas recogidas en el PG-3 y los valores mínimos de resistencia a esfuerzo cortante. En valores globales se observa como mejora la adherencia al aumentar la dotación, hasta llegar a un máximo, en torno a 600 g/m<sup>2</sup>, para luego disminuir o prácticamente mantenerse, según el tipo de mezcla, a 800 g/m<sup>2</sup>.

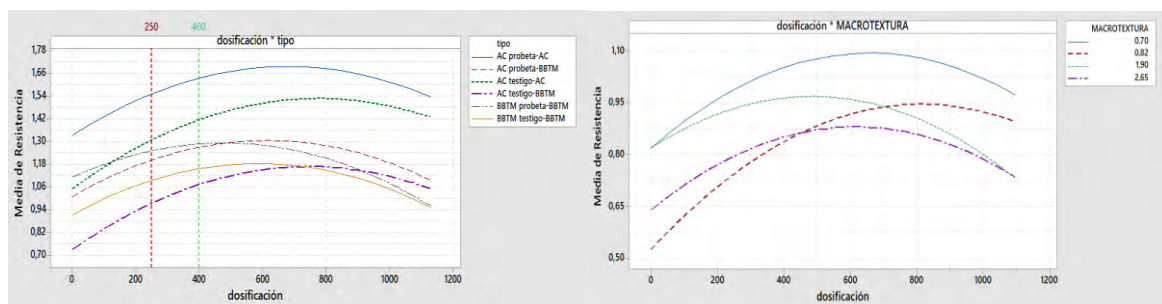


Figura 8. Estimación de dotación óptima para cada combinación de mezclas

Finalmente, se relacionaron los valores de resistencia a esfuerzo cortante obtenidos para cada dotación con los valores teóricos máximos, entendiendo éstos como los que produciría una probeta continua de cada tipo de mezcla. Los resultados se muestran en la tabla 3: valores medios del 66% (entre 58 y 74 % según el tipo de mezcla) para la dotación óptima. Las variaciones mayores se producen entre 0 y 200 g/m<sup>2</sup>. Apenas mejora un 5 % al pasar de 200 a 500 g/m<sup>2</sup>, y la disminución es mínima al pasar a 800 g/m<sup>2</sup>. Por tanto, un aumento de dotación de emulsión, con los problemas de puesta en obra que puede suponer, no mejora sustancialmente la adherencia



Tabla 3. Porcentaje de resistencia a esfuerzo cortante respecto al valor máximo.

<i>Macrotextura</i>	<i>Máxima resistencia MPa</i>	<i>Tipo de combinación</i>	Valores medios de resistencia a esfuerzo cortante, en MPa, para las dotaciones objetivo, en g/cm <sup>2</sup> .				% resistencia alcanzada por la unión de las capas respecto al máximo			
			0	200	500	800	0	200	500	800
0,70	1,65	AC probeta- AC	0,94	1,14	1,22	1,21	57	69	74	73
0,70	1,39	AC probeta- BBTM	0,77	0,87	0,92	0,94	55	63	66	68
0,82	1,65	AC testigo- AC	0,58	0,95	1,06	1,09	35	58	64	66
2,65	1,39	AC testigo- BBTM	0,36	0,77	0,81	0,79	26	55	58	57
1,90	1,39	BBTM probeta- BBTM	0,82	0,92	0,98	0,9	59	66	71	65
2,65	1,39	BBTM testigo- BBTM	0,64	0,79	0,85	0,83	46	57	61	60

#### 4 Modelo de elementos finitos para obtener las tensiones tangenciales entre capas de firme

##### 4.1 Definición geométrica

Se han realizado tres modelos para las distintas posibilidades de unión entre una capa semidensa y una capa discontinua. En cuanto a los espesores de cada una de ellas, y para quedarnos del lado de la seguridad, se ha optado por 4 cm para la mezcla semidensa y de 3 cm para la discontinua. En cuanto a la unión entre capas, y también para conseguir las máximas tensiones tangenciales, se ha considerado compatibilidad de deformaciones por lo que no puede haber ningún movimiento entre ambas capas.

##### 4.2 Definición de los materiales

Los dos tipos de mezclas bituminosas se han caracterizado por su módulo de elasticidad y su coeficiente Poisson y para lo obtención de los resultados que se indicaran en el último apartado se han considerado los siguientes valores:

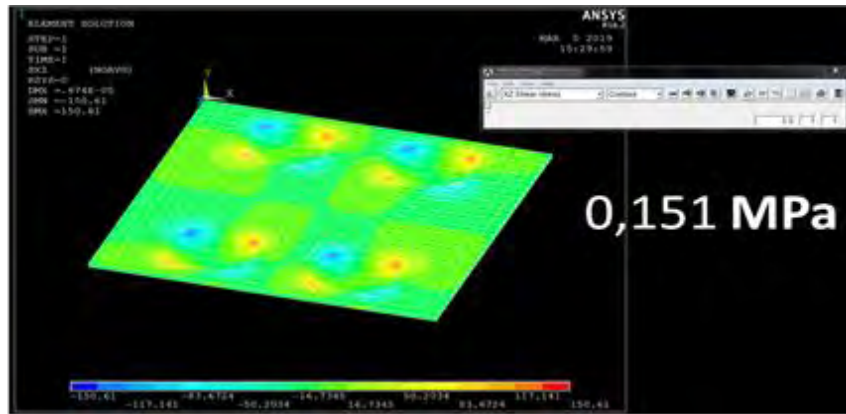
- Mezcla semidensa: Módulo de elasticidad: 6.000 MPa y Coeficiente de Poisson: 0.33
- Mezcla discontinua: Módulo de elasticidad: 4.000 MPa y Coeficiente de Poisson: 0.35

##### 4.3 Definición de las cargas aplicadas y resultados

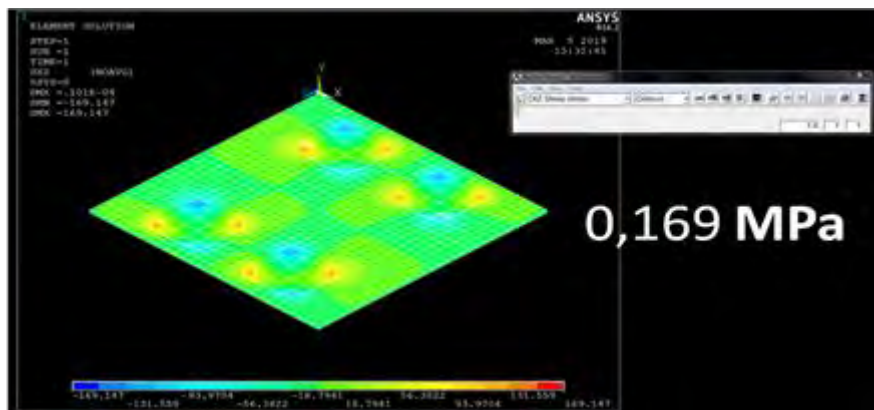
Las cargas introducidas en el modelo han sido las indicadas en la Instrucción sobre las acciones a considerar en el proyecto de puentes de carretera (IAP-11), ya que son cargas mayores que las indicadas en la normativa de dimensionamiento de firmes, y de esta forma obtendremos mayores tensiones tangenciales.

Se han considerado las cargas verticales debidas al tráfico de vehículos, tanto la carga distribuida como la carga puntual del vehículo pesado y las cargas horizontales debidas al frenado y arranque de los vehículos y las debidas al derrape por el frenado.

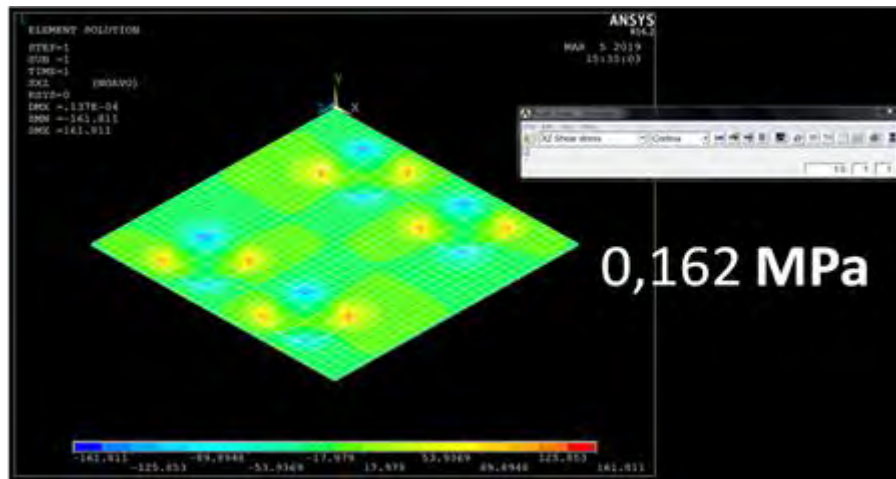
En la figura 10 se muestran los resultados de las tensiones tangenciales obtenidas entre las capas en los tres modelos que se han definido en el primer apartado:



a.- Semidensa-Semidensa



b.- Semidensa-discontinua



c.- Discontinua-Discontinua

Figura 10. Resultados de las tensiones tangenciales entre diferentes capas de firme

## 5 Conclusiones

Con la realización de ejercicios interlaboratorio con los dos dispositivos de corte se ha establecido que la precisión es comparable (en torno al 15% en términos de coeficiente de variación de reproducibilidad para resistencia a esfuerzo cortante), pero se han detectado diferencias significativas en los valores medios. Estas diferencias se han mostrado también en los testigos extraídos en los tramos de experimentación y en los ensayos para determinar dotaciones óptimas. Las diferencias varían con el tipo de mezcla, pero siempre se obtienen valores medios entre un 15 - 35% más bajos con el dispositivo B. Es preciso por tanto que las especificaciones indiquen el dispositivo de corte a utilizar. Por otra parte, teniendo en cuenta que la precisión del ensayo es del orden del 10 % en las mejores condiciones (la dispersión en testigos extraídos del firme es mayor que en testigos fabricados en laboratorio [1]), podría ser muy estricto establecer penalizaciones para valores entre el 90 y el 100% del valor especificado. Establecer el corte en el 75% de la especificación, como se establece en el LRRB [8] parece más adecuado en el estado actual del método

En cuanto a la influencia de la macrotextura de las capas bituminosas a adherir, en el rango de macrotexturas estudiadas se observa una tendencia a valores más altos a macrotexturas bajas, tanto en resistencia a esfuerzo cortante como en términos de energía, con influencia tanto de la macrotextura de la capa soporte como de la superior. Sin embargo, no se puede establecer una correlación univariante dotación-macrotextura porque también influyen otros factores: estado y dotación del ligante en la capa a tratar, pulimento de los áridos, etc.

Se han obtenido, para todo tipo de mezclas, dotaciones óptimas en torno a 500 - 600 g/m<sup>2</sup>. Un exceso de ligante puede reducir la adherencia, por un efecto de lubricación de las capas. También se observa que, a partir de 200 g/m<sup>2</sup> ya se alcanzan valores próximos al óptimo, que es de media el 66% del valor máximo (entre el 58-74 % para los diferentes tipos de combinaciones de mezclas).

El modelo de incrementos finitos conduce a valores de resistencia a esfuerzo cortante inferiores a 0.2 MPa, por debajo de las especificaciones actuales del PG-3.

## 6 Referencias

- [1]. Berenguer, J.M; Calvo, C; Molina, J; Gomariz, R; Peña, J.L. (2017). *El ensayo de adherencia de capas de firmes según NLT-382/08. Estudio comparativo de los resultados obtenidos con los dispositivos A y B*. XIX CILA, Medellín 2017
- [2]. Pliego de Prescripciones Técnicas Generales para obras de carreteras y puentes. Artículo 531. Orden FOM/2523/2014
- [3]. NLT-382/08. Evaluación de la adherencia entre capas de firme, mediante ensayo de corte.
- [4]. NLT-161/98. Resistencia a compresión simple de mezclas bituminosas
- [5]. UNE 82009-2:1999. Exactitud (veracidad y precisión) de resultados y métodos de medición. Parte 2: Método básico para la determinación de la repetibilidad y la reproducibilidad de un método de medición normalizado.
- [6]. ISO 13528:2015. Statistical methods for use in proficiency testing by interlaboratory comparison.
- [7]. Movilla, D; Raposeiras, A.C., Castro, D; Calzada M.A.; Vega A. *Optimización de la adhesividad y la adherencia en mezclas bituminosas en función de la naturaleza del filler y la dotación del riego utilizada*. Cuaderno Tecnológico de la PTC N° 01/2014. Plataforma Tecnológica de la Carretera. [www.ptcarretera.es](http://www.ptcarretera.es).
- [8]. Tack Coat Testing. Measuring Field Bond Strength. Minnesota Local Road Research Board. Department of Transportation. Mayo, 2015



## **Agradecimientos**

Este trabajo no hubiera sido posible sin la colaboración de todos los miembros del grupo de trabajo de adherencia de capas de ALEAS (Asociación de Laboratorios de Ensayo de ASEFMA): CEDEX, Laboratorio General de la Diputación Foral de Álava, Universidad Politécnica de Cataluña, CIESM Intevía, Eiffage Infraestructuras, Pavasal, Sorigué, Cepsa, Probisa, Campezo, Universidad de Alicante, Laboratorio de Carreteras de la Región de Murcia, Laboratorio de la Demarcación de Carreteras del Ministerio de Fomento en Murcia, Centro Regional de Control de Calidad de la Junta de Castilla y León.